

辅助电路与主开关并联的单相全桥节能逆变器

王 强^{1,2}, 岳远韶^{1,2}, 王天施^{1,2}, 刘晓琴^{1,2}

(1. 辽宁石油化工大学信息与控制工程学院, 辽宁抚顺 113001;

2. 辽宁石油化工大学石油化工过程控制国家级实验教学示范中心, 辽宁抚顺 113001)

摘 要: 为了改善逆变器的性能,提出了一种辅助电路与主开关并联的单相全桥节能逆变器. 逆变器采用受限单极式正弦脉宽调制(Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM)方法,在每个开关周期,只需要控制1个主开关和1个辅助开关的切换,辅助开关可以采用固定占空比控制,而且不需要设定谐振电流阈值来控制辅助开关. 在每个开关周期的换流过程中,需要切换的主开关所并联的谐振电容的电压能变化到零,主开关能实现零电压软开通. 辅助电路中无器件直接串联在直流母线上,可有效降低辅助电路通态损耗. 分析了电路工作原理,实验结果表明主开关和辅助开关都实现了软切换. 因此该拓扑能有效降低开关损耗和提高逆变器效率.

关键词: 逆变器; 谐振; 开关损耗; 零电压开关; 零电流开通

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2019)03-0764-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2019.03.035

A Single-Phase Full-Bridge Energy-Saving Inverter with Auxiliary Circuits in Parallel with Main Switches

WANG Qiang^{1,2}, YUE Yuan-shao^{1,2}, WANG Tian-shi^{1,2}, LIU Xiao-qin^{1,2}

(1. College of Information and Control Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun, Liaoning 113001, China;

2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Petrochemical Process Control, Fushun, Liaoning 113001, China)

Abstract: In order to improve performance of the inverter, a single-phase full bridge energy-saving inverter with auxiliary circuits in parallel with main switches is proposed. Limited monopole SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) is applied in the inverter. Only one main switch and one auxiliary switch need be controlled in every switching period. The duty cycle of the auxiliary switch is constant. Setting threshold of resonant current need not be designed to control the auxiliary switch. During the process of commutation in every switching period, the voltage across the resonant capacitor in parallel with the main switch decreases to zero and zero-voltage turning-on of the main switch can be achieved. All the components in the auxiliary circuit are not in series with DC (Direct current) bus, which can effectively reduce the conduction loss of auxiliary circuit. The working principle is analyzed in detail, and the experimental results show that the main switch and auxiliary switch can realize soft-switching. Therefore, the topology can effectively reduce the switching losses and improve efficiency of the inverter.

Key words: inverter; resonant; switching loss; zero-voltage switching; zero-current turning-on

1 引言

软开关技术通过设置辅助谐振电路,使开关器件实现软切换,减小了开关损耗,提高了逆变器效率^[1-2]. 近些年,研究人员设计了多种软开关逆变器的拓扑结构^[3-6],文献[3]提出的拓扑结构中含有变压器,存在剩

磁通逐渐累积而导致变压器铁心饱和的问题;文献[4]提出的软开关逆变器为建立中性点电位需要在直流母线之间串接两个大电容,随着逆变器开关频率的提高,电容充放电频率加快,中性点电位容易发生波动,影响逆变器的稳定运行. 文献[5,6]提出的逆变器电路中虽然没有采用分压电容,不存在中性点电位波动问题,但

收稿日期:2017-06-22;修回日期:2017-09-26;责任编辑:梅志强

基金项目:国家自然科学基金(No. 51207069);辽宁省自然科学基金指导计划项目(No. 20170540586);辽宁石油化工大学国家级科研项目培育基金(No. 2016PY-016)

是需要设定谐振电流阈值来实现对辅助开关的控制,这要额外添加计时与测量模块,增加了辅助电路损耗,而且使控制复杂化。

本文提出了一种辅助电路与主开关并联的单相全桥节能逆变器,针对上述文献的缺点和不足进行了改进,具有以下特点:(1)电路中未设置变压器和分压电容,不存在变压器饱和问题和逆变器中性点电位波动问题;(2)逆变器采用受限单极式 SPWM 控制方法,在每个开关周期只需要切换 1 个主开关和 1 个辅助开关,辅助开关可以采用固定占空比控制,而且在换流过程中,流过谐振电感的电流上升到与负载电流相等时,电路自然进入谐振过程,不需要辅助开关的切换来触发谐振过程,也无需通过配置电感电流阈值来控制辅助开关,实现了逆变器控制简单化;(3)在谐振电路作用下,主开关器件动作时能完成零电压软切换,辅助开关器件动作时能完成零电流软开通.文中分析了电路在一个开关周期内的工作流程,在额定功率为 2kW 的实验样机上验证了该新型单相全桥节能逆变器的性能。

2 电路构成及工作流程

2.1 电路构成

逆变器主电路如图 1 所示,4 个桥臂组成全桥逆变电路, E 为直流电源, S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 为逆变器的主开关, D_1 、 D_2 、 D_3 和 D_4 为主开关反并联的二极管.每个主开关都并联了 1 组辅助谐振电路.每组辅助电路包括 1 个辅助开关管 S_a (S_b 、 S_c 、 S_d),及其反并联二极管 D_a (D_b 、 D_c 、 D_d),1 个谐振电感 L_a (L_b 、 L_c 、 L_d),1 个谐振电容 C_1 (C_2 、 C_3 、 C_4),2 个辅助二极管 D_{a1} (D_{b1} 、 D_{c1} 、 D_{d1}) 和 D_{a2} (D_{b2} 、 D_{c2} 、 D_{d2}).分析之前先做以下假设^[7-9]:1)元件均工作在理想状态.2)负载电感足够大,一个开关周期内可将负载等效成恒流源 I_0 .图 1 中各谐振电感的电感值都相同,设 $L_a = L_b = L_c = L_d$;各谐振电容的电容值都相同,设 $C_1 = C_2 = C_3 = C_4$.各物理量参考正方向已在图 1 中标出。

2.2 工作流程

该逆变器采用受限单极式 SPWM 控制方法,在负载电流方向为正时,图 1 中的主开关 S_1 处于高频切换状态,主开关 S_2 和 S_3 保持关断状态,主开关 S_4 保持开通状态,这样每个开关周期中,只有 1 个主开关发生切换.在负载电流方向为正时,有 8 个流程被包含在电路每个开关周期的工作过程中,电路特征波形如图 2 所示,图 3 为各流程等效电路图。

流程 1 ($t_0 \sim t_1$): S_1 处于开通状态,辅助电路不工作,电路处于稳定运行状态。

流程 2 ($t_1 \sim t_2$): 在 t_1 时刻,关断 S_1 ,因 C_1 限制了 S_1

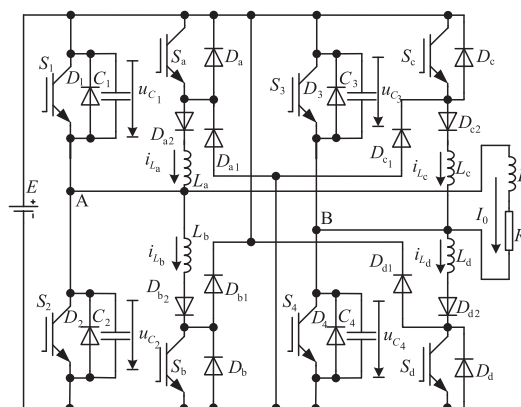


图1 主开关并联辅助电路的单相全桥节能逆变器主电路

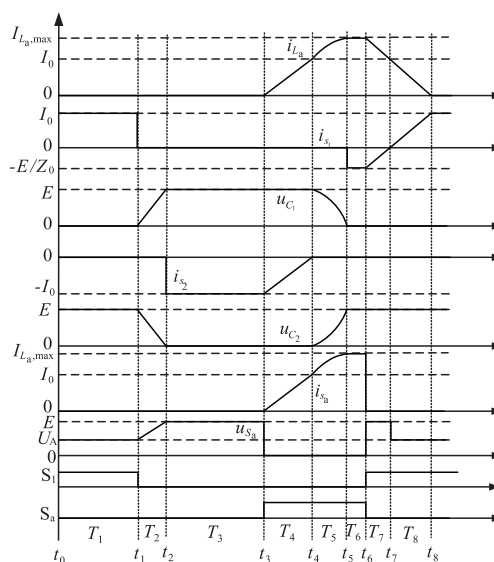


图2 电路的理论工作波形

关断时的电压变化速度,所以 S_1 在关断时处于零电压软关断状态. S_1 被关断以后,直流电源无法向负载供电,负载电流 I_0 通过 C_1 和 C_2 实现续流, C_1 被充电, C_2 放电,流过 C_1 和 C_2 的电流值都等于 $I_0/2$, u_{c1} 处于线性增大状态, u_{c2} 处于线性减小状态. 当 u_{c1} 变化到直流电源电压 E 时, D_2 导通,本流程结束。

流程 3 ($t_2 \sim t_3$): 电路处于稳态,辅助电路不工作,负载电流通过 D_2 续流. 本流程中 $u_{c1} = E$, $u_{c2} = 0$, $i_{L_c} = 0$. 需要说明的是在该流程中始终有电流流过 D_2 , 流程 3 的持续时间 T_3 越长, D_2 的通态损耗越大,将会影响到系统的效率,所以为限制 D_2 的通态损耗,在电路实际运行时,可以把该稳态流程的时间设为零,即流程 2 结束之后,电路直接进入流程 4。

流程 4 ($t_3 \sim t_4$): 在 t_3 时刻,开通 S_a ,由于 L_a 限制了 S_a 发生开通动作时的电流上升速度,所以 S_a 在开通时处于零电流软开通状态. 在该流程中,电源电压 E 施加在 L_a 两端, i_{L_c} 以恒定的速度增大,当 i_{L_c} 在 t_4 时刻增大到

I_0 时, D_2 实现自然关断, 本流程结束.

流程 5 ($t_4 \sim t_5$): 在 t_4 时刻, L_a, C_1 和 C_2 开始谐振, i_{L_a} 继续增大, C_1 放电, C_2 被充电, u_{C_1} 减小, u_{C_2} 增大, 当 u_{C_1} 减小到 0 时, i_{L_a} 增大到极值 $I_{L_a, \max}$, 本流程结束.

流程 6 ($t_5 \sim t_6$): 在 t_5 时刻, u_{C_1} 减小到 0, D_1 导通, 本流程中 $i_{L_a} = I_{L_a, \max}$, $u_{C_1} = 0$, $u_{C_2} = E$.

流程 7 ($t_6 \sim t_7$): 在 t_6 时刻, 关断 S_a , 同时开通 S_1, S_1 可以实现零电压开通. 然后存储在电感 L_a 中的剩余能

量一部分开始通过二极管 D_1, D_{a1} 和 D_{a2} 回馈给直流电源, 另一部分向负载转移. i_{L_a} 处于线性减小状态, 当其减小至 I_0 时, D_1 截止, 本流程结束.

流程 8 ($t_7 \sim t_8$): 在 t_7 时刻, 电流开始流过 S_1, i_{S_1} 开始处于线性增大状态, i_{L_a} 继续处于线性减小状态. 当 i_{L_a} 减小至零时, 本流程结束. 然后电路返回流程 1, 进入下一个开关周期.

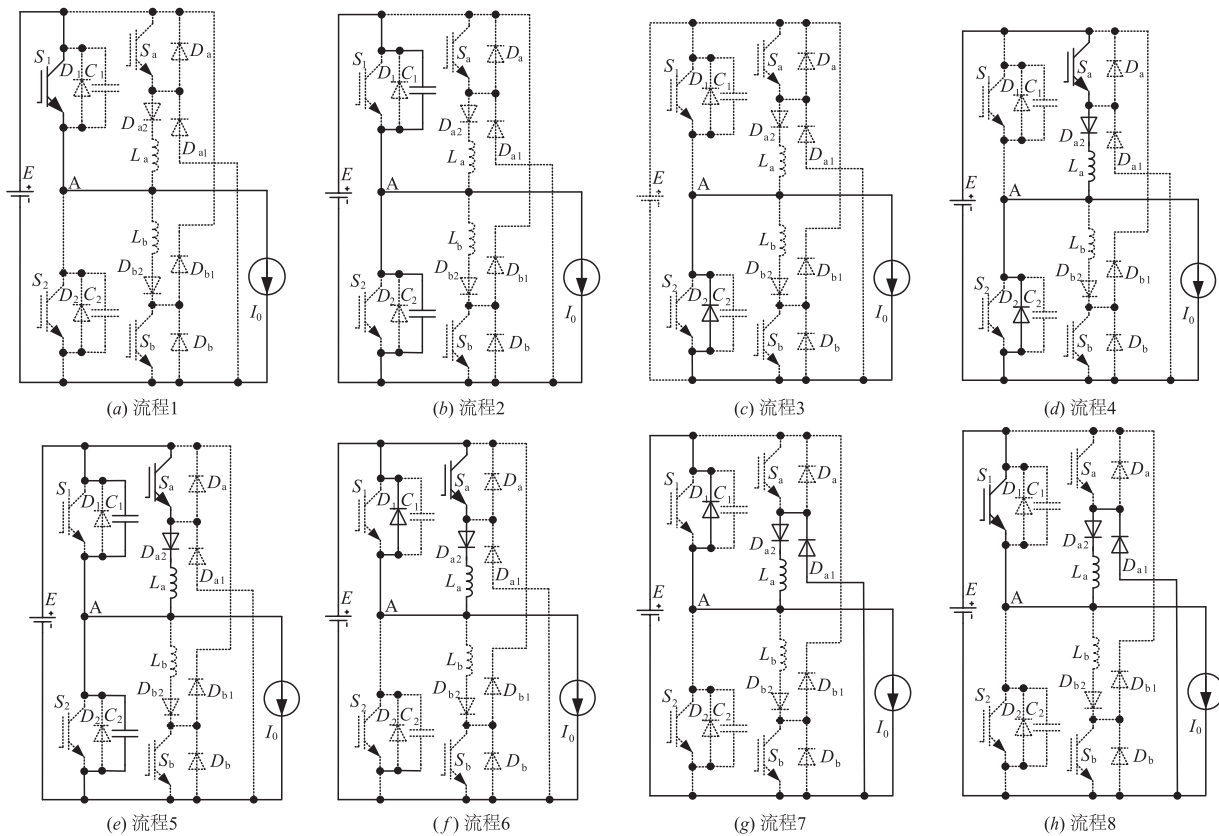


图3 各工作流程的等效电路图

3 实验验证

根据图 1 搭建实验电路, 实验参数为直流输入电压 $E = 200\text{V}$, 输出功率 $P_0 = 2\text{kW}$, 逆变器输出电流峰值 $I_{0, \max} = 24\text{A}$, 输出电压有效值 $U_0 = 120\text{V}$, 负载电阻 $R = 7\Omega$, 负载电感 $L = 1\text{mH}$, 谐振电感 $L_a = L_b = L_c = L_d = 11\mu\text{H}$, 谐振电容 $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 68\text{nF}$, 逆变器死区时间 $\Delta = 2\mu\text{s}$, 辅助开关 S_a 触发脉冲占空比为 $\rho_{sa} = 0.0648$, 开关频率 $f_c = 20\text{kHz}$, 输出频率 $f_0 = 50\text{Hz}$.

图 4(a) 为电路谐振电流和谐振电压波形, 基本符合图 3 的理论特征波形; 图 4(b) 和图 4(c) 分别为满载

和轻载情况下, 逆变器的上桥臂的主开关器件 S_1 进行状态切换过程中承受的电压 u_{S_1} 及所流经的电流 i_{S_1} 的实验波形, 可知 S_1 开通前, 电压 u_{S_1} 已先降到零, 所以 S_1 在开通过程中完成了零电压软开通动作; 当 S_1 关断时, 电压变化率明显低于硬关断时的电压变化率, 所以 S_1 在关断过程中完成了零电压软关断动作. 因此主开关 S_1 在轻载和满载时都可以完成软开关切换. 图 4(d) 为逆变器的辅助开关 S_a 进行状态切换时的端电压 u_{sa} 和所流经的电流 i_{sa} 的实验波形, 可知 S_a 开通时电压和电流同时变化, 流过 S_a 的电流以较低的变化率缓慢增大, S_a 完成了零电流软开通.

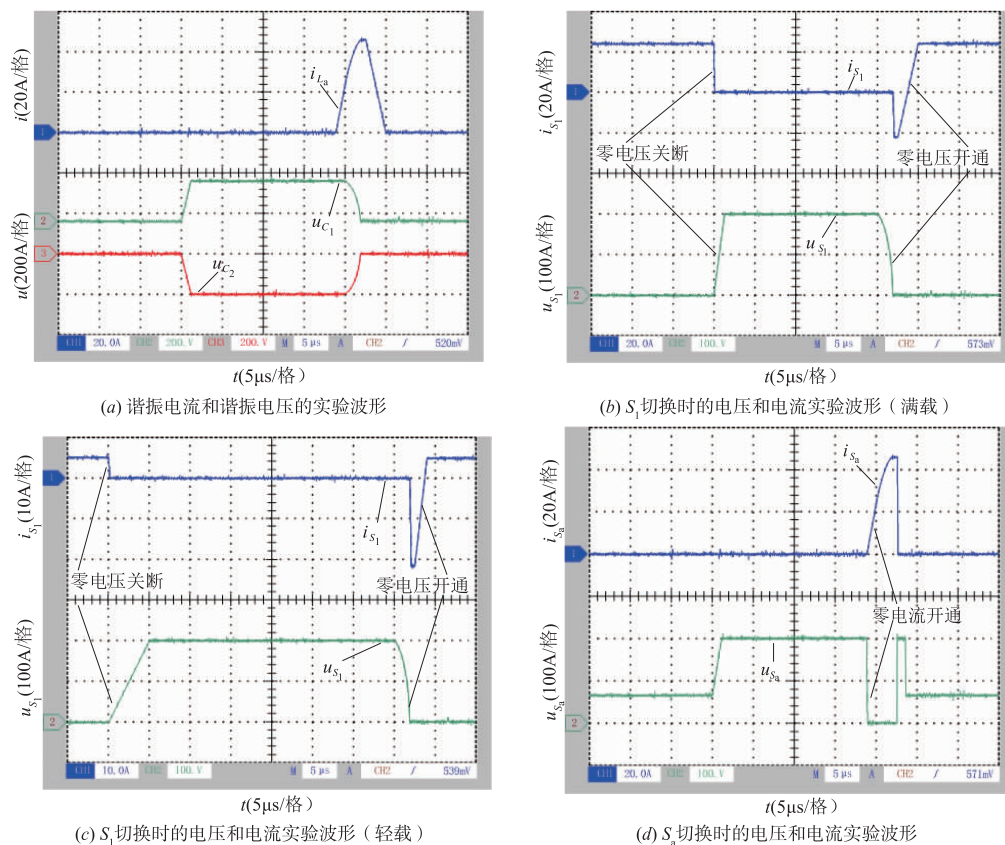


图4 实验波形

4 结论

设计了辅助电路与主开关并联的单相全桥节能逆变器,显著特点是逆变器采用相对简单的受限单极式 SPWM 控制方法,辅助开关可以采用固定占空比控制,不需要设定与辅助开关控制相关的电感电流阈值,有利于减小辅助电路损耗和降低控制难度;在拓扑结构上与文献[5]中的电路相比,本文电路中没有设置双向辅助开关,有利于减少开关器件的寄生震荡,而且本文与文献[6]中的电路相比,本文电路中没有设置起均压作用的变压器和相应的去磁复位电路,有利于简化电路结构;本文电路的主开关的通态损耗低于文献[5,6]中的电路,因为本文电路的主开关承受的电流值不会超过负载电流值,而文献[5,6]中的电路的主开关承受的电流值会超过负载电流。通过实验分析得出以下结论:(1)在逆变器处于轻载和满载时,逆变器主开关在切换过程中能完成零电压开关;(2)在辅助电路参与换流时,辅助开关在切换时能完成零电流开通。对于提高单相全桥节能逆变器的实用性,本文的研究工作具有一定参考价值。

参考文献

[1] 王强,刘岩松,陈祥雪,等. 基于单独储能电容辅助换流

的并联谐振直流环节逆变器[J]. 电子学报,2015,43(10):2133-2136.

Wang Qiang, Liu Yansong, Chen Xiangxue, et al. Parallel resonant DC link inverter with a single storage capacitor-assisted commutation [J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(10):2133-2136. (in Chinese)

[2] 王强,刘岩松,陈祥雪,等. 具有单辅助开关的谐振直流环节逆变器[J]. 电子学报,2014,42(11):2321-2324.

Wang Qiang, Liu Yansong, Chen Xiangxue, et al. Resonant DC link inverter with a single auxiliary switch [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(11):2321-2324. (in Chinese)

[3] Pan Zhiyang, Luo Fanglin. Novel resonant pole inverter for brushless DC motor drive system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1):173-181.

[4] 贺虎成,刘卫国,解恩. 一种新型无刷直流电机谐振极软开关逆变器[J]. 电工技术学报,2008,23(12):99-106.

He Hucheng, Liu Weiguo, Xie En. A novel resonant pole inverter for brushless DC motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(12):99-106. (in Chinese)

[5] 潘三博,潘俊民. 一种新型的零电压谐振极型逆变器[J]. 中国电机工程学报,2006,26(24):55-59.

Pan Sanbo, Pan Junmin. A novel zero-voltage switching resonant pole inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2006,

- 26(24):55-59. (in Chinese)
- [6] 王强. 无中性点电位变化的辅助谐振变换极逆变器[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(18):27-32.
Wang Qiang. Auxiliary resonant commutated pole inverter without change of neutral point potential [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(18):27-32. (in Chinese)
- [7] 王强, 单瑞香, 王天施, 等. 单相全桥谐振直流环节软开关逆变器[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(3):38-47.
Wang Qiang, Shan Ruixiang, Wang Tianshi, et al. Single-phase full-bridge resonant DC-link soft-switching inverter [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(3):38-47. (in Chinese)
- [8] 王强, 刘岩松, 陈祥雪, 等. 具有低能耗辅助电路的并联谐振直流环节逆变器[J]. 电子学报, 2014, 42(7):1369-1373.
Wang Qiang, Liu Yansong, Chen Xiangxue, et al. Parallel resonant DC link inverter with low-loss auxiliary circuit [J]. Acta Electronic Sinica, 2014, 42(7):1369-1373. (in Chinese)
- [9] 王强, 唐朝垠, 王天施, 等. 用于无刷直流电机驱动的谐振极软开关逆变器[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(6):59-65.
Wang Qiang, Tang Chaoyin, Wang Tianshi, et al. A resonant pole soft-switching inverter for brushless DC motor drives [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(6):59-65. (in Chinese)

作者简介



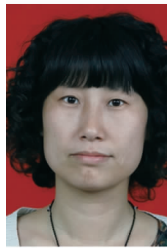
王 强 (通讯作者) 男, 1981 年 10 月出生于辽宁省沈阳市, 博士, 现为辽宁石油化工大学信息与控制工程学院副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为软开关变换器的电路拓扑及控制。
E-mail: master2007@126.com



岳远韶 男, 1993 年 3 月出生于江苏省徐州市, 现为辽宁石油化工大学信息与控制工程学院硕士研究生, 主要研究方向为软开关变换器的电路拓扑及控制。
E-mail: 1216068881@qq.com



王天施 男, 1970 年 1 月出生于辽宁省法库县, 博士, 现为辽宁石油化工大学信息与控制工程学院副教授, 主要研究方向为软开关变换器的电路拓扑及控制。
E-mail: wts55@126.com



刘晓琴 女, 1975 年 2 月出生于辽宁省辽阳县, 硕士, 现为辽宁石油化工大学信息与控制工程学院副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为软开关变换器的电路拓扑及控制。
E-mail: qinbuluoge@163.com